



**Aalborg Universitet**

**AALBORG UNIVERSITY**  
DENMARK

## **Kortlægning af eksisterende viden om indtrængning af PCB fra fuger til beton - en litteraturgennemgang**

*Opdateret vejledning om frasortering af PCB-holdigt affald*

Andersen, Helle Vibeke; Gunnarsen, Lars; Kampmann, Kristoffer

*Publication date:*  
2013

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*

Andersen, H. V., Gunnarsen, L., & Kampmann, K. (2013). *Kortlægning af eksisterende viden om indtrængning af PCB fra fuger til beton - en litteraturgennemgang: Opdateret vejledning om frasortering af PCB-holdigt affald*. Miljøstyrelsen. <http://www.mst.dk/Publikationer/Publikationer/2013/Februar/978-87-92903-86-0.htm>

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- ? Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- ? You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- ? You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



Miljøministeriet  
Miljøstyrelsen

# Kortlægning af eksisterende viden om indtrængning af PCB fra fuger til beton – en litteraturgennemgang

Opdateret vejledning om frasortering af  
PCB-holdigt affald

Miljøprojekt nr. 1464, 2013

**Titel:**

Kortlægning af eksisterende viden om  
indtrængning af PCB fra fuger til beton – en  
litteraturgennemgang

**Redaktion:**

Helle Vibeke Andersen, Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg  
Universitet  
Lars Gundersen, Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet  
Kristoffer Kampmann, Dansk MiljøAnalyse

**Udgiver:**

Miljøstyrelsen  
Strandgade 29  
1401 København K  
[www.mst.dk](http://www.mst.dk)

**År:**

2013

**ISBN nr.**

978-87-92903-86-0

**Ansvarsfraskrivelse:**

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

# Indhold

<b>Forord.....</b>	<b>4</b>
<b>Konklusion og sammenfatning .....</b>	<b>6</b>
<b>1. Litteraturstudie.....</b>	<b>8</b>
1.1 PCB indtrængning i beton og tegl .....	8
1.2 PCB-indhold i byggematerialer .....	11
<b>2. Prøveserier fra byggesager .....</b>	<b>14</b>
2.1 Fugekoncentration af PCB.....	14
2.2 PCB-indhold i.f.t. afstand til fuge.....	16
<b>3. Sammenligning af data og litteratur .....</b>	<b>21</b>
<b>Referencer .....</b>	<b>24</b>

# Forord

Polychlorede Biphenyler (PCB) har været anvendt lovligt som blødgørere i elastiske og bløde byggematerialer i perioden fra ca. 1950 til 1. januar 1977 i Danmark. Man regner med god sikkerhed med, at der ikke findes PCB-holdige byggevarer i bygninger opført fra 1978.

Materialer, der kan indeholde PCB, er primært fugemasser, lime og termokit i termoruder. Der er også eksempler på, at man har fundet PCB i udvendig maling, skridsikker maling til inden- og udendørs brug, i flammehæmmende maling til stålkonstruktioner, i ikke-mineralske akustikplader og i gulvudjævningsmasser. Fugemasserne er brugt ved samlinger omkring facadeplader, omkring vinduer og døre, i dilationsfuger og mellem bygningsdele og i forbindelse med balkoner. Fugerne har været anvendt både indvendigt og udvendigt. Der er typisk anvendt elastiske fuger i bygninger af betonelementer samt i bygninger med lette facadeelementer. PCB-holdige fugematerialer var blandt de dyreste med de bedste tekniske egenskaber. Derfor kan man i særlig grad forvente at finde dem på steder med særlige krav til strækkeevne og holdbarhed f.eks. mellem lette og tunge facadeelementer samt mellem dørpartier og tunge vægge.

På baggrund af antagelser om levetiden af PCB i byggematerialer, blev der lavet prognoser om et fald af mængden af PCB i byggeaffald, men det har vist sig ikke at holde, da man tidligere har underestimeret levetiden af PCB i åbne anvendelser som bl.a. fugemasse (Jensen et al., 2009). Det har endvidere vist sig, at PCB i fugemasse har spredt sig til de tilstødende byggematerialer og kontamineret disse i en grad, der kræver særlige hensyn i.f.t. genanvendelse af byggeaffald.

De PCB-holdige byggematerialer betegnes som en primær PCB-kilde, idet PCB er tilsat materialet. Den afsmittning og spredning af PCB, der har været til de byggematerialer, der grænser op til den primære kilde, betegnes som en sekundær forurening, mens den spredning der er sket ved, at PCB er fordampet til luften og derefter afsat på forskellige materialer, kaldes en tertiær forurening.

## Formål, indhold og metode

NIRAS, Statens Byggeinstitut (SBI) og Dansk MiljøAnalyse (DMA) har fået til opgave af Miljøstyrelsen at opdatere vejledning om frasortering af PCB-holdigt affald, herunder frasortering af PCB-holdigt beton. Opgaven indgår som Initiativ 13 i Regeringens "Handlingsplan for håndtering af PCB i bygninger - indeklima, arbejdsmiljø og affald" af 18. maj 2011. Projektets formål er på kort sigt at styrke det faglige grundlag og efterfølgende udsortering af PCB i bygge- og anlægsaffald.

Som en del af denne opgave har SBI gennemført litteraturgennemgang/kortlægning af eksisterende viden om indtrængning af PCB fra fuger til beton. Sammen med indsamlede data om indtrængning af PCB fra fuger til beton skal kortlægningen danne grundlag for vejledning specielt om frasortering og håndtering (nedrivningsvejledning) af PCB-forurenede beton. Der er lagt særlig vægt på indtrængning i beton og tegl, da fokus er på genanvendelse af byggematerialer. Netop beton og tegl udgør det største genanvendelsespotentiale ved renoveringer og nedrivninger.

Der er søgt på Aalborg Universitets Biblioteks databaser og internationale tidsskrifter. Sideløbende med litteraturstudiet har NIRAS og DMA indsamlet oplysninger om fund af PCB i gennemførte nedrivninger og renoveringer fra perioden 1950 – 1977. I denne forbindelse er der behandlet datasæt af eksisterende kemiske analyser af byggematerialer fra undersøgelsen af renoveringer og

nedrivninger af bygninger, hvor der er fundet PCB. De publicerede undersøgelser fra litteraturstudiet refereres i nærværende rapport og dernæst præsenteres en analyse af de udvalgte bearbejdede data og disse sammenholdes med litteraturstudiet.

## **Projektorganisation**

Projektet er udført under ledelse af en projektgruppe, med følgende deltagere:

- Erik K. Lauritzen, NIRAS, projektleder
- Bo Peter Alslev, NIRAS
- Johan F. Gjødvad, NIRAS
- Ole Geisler, Dansk MiljøAnalyse
- Kristoffer Kampmann, Dansk MiljøAnalyse
- Lars Gundersen, Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet
- Helle Vibeke Andersen, Statens Byggeforskningsinstitut Aalborg Universitet

I forbindelse med gennemførelse af projektet har der været nedsat en følgegruppe med følgende medlemmer:

- Anne-Sofie Nielsen, Miljøstyrelsen, formand
- Hanne Johnsen, Affald Danmark
- Nanna Winkler, Affald Danmark
- Henning Ettrup, Affald Varme Aarhus
- René Møller Rosendal, Renosam
- Simon Stig Gylling, Dansk Byggeri
- Inga Larsen, Vestforbrænding
- Jens Neirup, Københavns kommune, Kalvebod Miljøcenter
- Finn Rasmussen, Københavns kommune, Teknik- og Miljøforvaltningen
- Anders Christiansen, Kommunernes Landsforening
- Bent Madsen, Boligselskabernes Landsforening

# Konklusion og sammenfatning

Der er gennemført et litteraturstudie om indtrængningen af PCB i byggematerialer, der grænser op til PCB-holdig fugemasse, med særlig vægt på beton og tegl. Det er konstateret, at der ikke findes meget litteratur om emnet, men der er fundet en række svenske undersøgelser. De svenske undersøgelser omhandler primært udvendige fuger og viser, at der er stor variation i indtrængningen af PCB i byggematerialer. Der ses mindre indtrængning i træ sammenholdt med beton, tegl, mens der ses størst indtrængning i letbeton. Porøsiteten af materialerne forventes at have betydning, i.e. jo mere porøst materiale, jo større indtrængning. Der foreligger ingen karakteristik af byggematerialerne i de svenske undersøgelser.

Der er udvalgt en række prøveserier fra prøvetagning af udvendig beton, tegl og gasbeton fra indsamlingen af data fra renoverings- og nedrivningssager med PCB-holdige materialer. De bearbejdede data for prøveserierne af beton og tegl viser ikke nogen entydig sammenhæng mellem koncentration af PCB i fugemasse og i den tilstødende materialeprøve. En analyse af fugekoncentrationen er derfor ikke tilstrækkeligt til at sige noget om, hvorvidt der er en kontaminering af byggematerialerne. Der ses spredning ud i større afstande fra fugen på tegl sammenlignet med beton.

Der foreligger ikke noget materiale på transportmekanismen af PCB i byggematerialer. Nærværende sammenligning mellem forskellige estimater og bud på spredning tyder på, at den beregnede diffusionskoefficient fra Ljung et al. (2002) på de her antagne betingelser underestimerer indtrængningen. Rex et al. (2002) har tilpasset data for både beton, tegl og letbeton til en funktion med et potensforløb, mens de her udvalgte prøveserier for beton følger et eksponentielt forløb, mens teglserierne følger et potensforløb. Dog skal bemærkes, at der relativt også er taget flere teglprøver i de større afstande til fugen sammenlignet med beton. Et eksponentielt forløb for koncentrationsprofilen i prøveserien relaterer til Ficks 2. lov for diffusion, mens der ikke umiddelbart er nogen forklaring på, hvorfor prøveserierne for tegl følger et andet forløb. Det spekuleres, at teglprøverne måske i højere grad end betonprøverne kan indeholde rester af fugemasse, der fysisk er trængt ind i det første prøvelag pga. en formodet større porøsitet. Dermed kan indtrængningsmekanismen i de første millimeter af tegl være mere effektiv og følge andre principper end indtrængningen ved diffusion i større afstand til den primære kilde.

Nærværende analyse af data fra litteraturen samt prøveserier tyder på, at man når under grænsen for farlig affald på 50 ppm PCB i en afstand af 5 cm fra fugen i de undersøgte materialer. Gasbeton kan dog være en undtagelse.

I forhold til grænseværdien for genanvendelse af affald på 0,1 ppm PCB viser analysen for beton, at man på baggrund af de svenske tal skal ud i en afstand på 18 cm for at nå under grænseværdien, mens man på baggrund af de her analyserede prøveserier og en "worst case" tilgang skal ud i en afstand af 11 cm.

For tegl er de svenske tal sammenlignelige med deres resultater for beton. I nærværende analyse af prøveserier med tegl og med tilgangen med udregning af "worst case" udregnes en afstand på 46 cm fra fugen før en værdi på 0,1 ppm PCB kan forventes. Dette er betydelig større indtrængning end for beton og også erfaringsmæssigt en afstand, der synes urealistisk. Modificeres denne udregning ud fra en argumentation om fysisk indtrængning af fugemasse i den prøve, der støder op til fugen, fås en afstand på 28 cm.

Materialet på gasbeton tyder på stor indtrængning af PCB, men er samtidigt så begrænset, at der ikke kan siges noget generelt.

Da der er store variationer i rapporterede data og manglende viden om repræsentativiteten af de her analyserede prøveserier må det anbefales, at man i hver enkelt byggesag tager prøver for at sikre sig, at man håndterer materialerne korrekt. De angivne afstande i nærværende rapport kan bruges som en indikation for, at man kan have behov for at tage prøver ud til disse afstande eller længere, hvis der viser sig PCB i primærkilden/fugen.



# 1. Litteraturstudie

Der er søgt på Aalborg Universitets databaser (Scopus, Academic Research Library, Compendex) samt diverse internationale tidsskrifter (via web of Science og Google Scholar) og der er søgt på internettet, bl.a. hjemmesider for miljøstyrelser og byggeforskningsinstitutter i en række europæiske lande samt USA. Der er søgt på forskellige kombinationer af følgende danske søgeord: Poly-Chlorerede Biphenyler, PCB, fuge, bygninger, beton, gasbeton, tegl, murværk, indtrængning, diffusion, migration, fast affald, oprydning. Der er søgt på forskellige kombinationer af følgende engelske søgeord: Poly-Chlorinated Biphenyls, PCB, sealant, caulk, building, building material, concrete, brick, masonry, diffusion, solid waste, remediation.

Litteraturstudiet har vist, at der findes forholdsvis få publicerede undersøgelser af PCB-indtrængning i byggematerialer fra fugemasse. Der er lavet en svensk rapport om spredning af PCB fra fugemasse til afgrænsende materialer (Rex et al., 2002) og den er meget central i forhold til nærværende problemstilling. Der er ligeledes søgt efter materiale, der omhandler de transportprocesser, hvormed PCB'en trænger ind i beton og/eller tegl og også her er det meget sparsomt, hvad der er fundet.

Gennem litteratursøgningsforløbet er der fundet referencer med fokus på PCB i fugemasser og maling i bygninger og den afledede kontaminering af det ydre miljø omkring bygningerne, specielt kontaminering af jord (f.eks. Andersson et al., 2004; Hellman & Puhakka, 2001; Herrick et al., 2007; Jartun et al., 2009, Priha et al., 2005; Sundahl et al., 1999, Sundahl et al., 2001). I mange lande er man opmærksom på, at PCB-holdige fugematerialer kan kontaminere afgrænsende byggematerialer og afhængig af forureningsgraden anvises forskellige håndteringer, bl.a. i USA (EPA 2009).

Flere undersøgelser peger på store variationer i indtrængningen af PCB i byggematerialer. Dette har bl.a. at gøre med byggematerialernes diffusionsegenskaber og for at danne et indtryk af variationen er der nedenfor redegjort for nogle egenskaber ved beton og tegl.

## 1.1 PCB spredning og beton og tegl

Indledningsvis gives en meget overordnet beskrivelse af beton, dels for at illustrere, at beton kan have meget forskellige egenskaber, dels for at forklare, hvad det er for mulige transportprocesser af PCB indtrængning i byggematerialer, der henvises til i litteraturen længere nede i teksten.

Beton er et uorganisk materiale, der fremstilles af et tilslagsmateriale (som regel sand, sten og grus), portlandcement (eller modifikationer heraf), der ved kemisk reaktion med vand, der er betonens sidste komponent, danner et bindemiddel (cementpasta), der binder tilslagskornene sammen. Tilslagsmaterialet udgør normalt 75% af betonens samlede rumfang. Den hærtnede cementpasta er opbygget af uhydratiserede cementkorn og hydratiseringsprodukter, som ofte benævnes cementgel. Materialet er porøst og porestrukturen er karakteriseret ved *gelporer*, der er fine hulrum i cementgelen, *kapillarporer*, der er hulrum imellem de oprindelige cementpartikler, som ikke er udfyldt med cementgel og *makroporer*, der er væsentlig større end cementpartiklerne. Til kapillarporer og makroporer hører også de hulrum og spalter, som kan dannes langs tilslagskorn, hvis der ikke er vedhæftning mellem tilslag og cementpasta (Herholdt et al., 1985).

Porestrukturen har afgørende betydning for betonens egenskaber, idet styrken af betonen vokser og permeabiliteten aftager med aftagende porøsitet og aftagende porestørrelse. Styrken bliver også desto større, jo mere afrundede porerne er. Ved valg af betonsammensætning (især vand/cementforholdet) og komprimeringsmetodik kan man påvirke kapillarporøsitet og makroporøsitet. Følgende er kilder til porer og huller i beton:

- Cementpastaens gelporøsitet
- Cementpastaens kapillarporøsitet
- Tilslagsets porøsitet
- Revner og sprækker langs tilslagskorn
- Indblandet luft til frostbeskyttelse
- Indkapslet luft pga. utilstrækkelig komprimering
- Revnedannelser pga. skadelige omdannelser eller overbelastning

Porøsitet er defineret som porevolumen målt i forhold til den betragtede prøves totalvolumen. Afhængig af hvilke porer man ønsker at beskrive, taler man om den åbne porøsitet, den lukkede porøsitet, totalporøsiteten og om hulrumsprocenten (Herholdt et al., 1985).

Frostsikker beton til udvendig brug er normalt fremstillet ved tilsætning af skumningsmidler, der øger forekomsten af makroporer, så vandets ekspansion ved frysning kan optages uden, at betonens struktur nedbrydes.

Da der ikke er fundet nogen beskrivelser af mekanismen bag transporten af PCB i beton, gives en kortfattet beskrivelse af transporten af vand i beton. Vand transporteres gennem beton som væske eller som damp. Den drivende kraft er kapillarsugning, forskelle i væsketryk eller i damptryk. Dampdiffusion er vandmolekylernes vandring i gasfase fra højt mod lavt damptryk. Diffusion vil foregå i alle de gasfyldte porer. Ved højere relative luftfugtigheder vil en del af porerne være vandfyldte og transporten vil foregå som en kombineret diffusions- og kapillarsugningsmekanisme, hvor der sker en kondensation på opstrøms menisk, vandstrøm gennem poren og fordampning fra nedstrøms menisk. En menisk er en krum vandoverflade, der dannes i hulrummene under udtørringen af en vandlagret cementpasta. I sammenhæng med beton anvendes ordet "diffusion" ofte om denne kombinerede mekanisme. Der kan også være en kapillarsugning fra en menisk til en anden og denne mekanisme transporterer langt mere vand gennem en given pore end diffusionen gør. Strukturen af betonen har betydning for den hastighed hermed vand drives igennem. I beton med normalt tæt tilslag transporteres vandet i cementpastaen. I cementpastaen er det mængden af sammenhængende kapillarporer, som har størst betydning for transporten. Højt vand/cementforhold og lav hydratiseringsgrad giver stor sammenhængende kapillarporøsitet, mens lavt vand/cementforhold (< ca. 0,4) og fuld hydratisering betyder, at der ikke er nogen kapillarporøsitet af betydning. Kontaktzonen mellem sten og cementpasta vil ofte være mere porøs end cementpastaen og er herved en lettere transportvej. Store sten giver større sammenhængende zoner end små sten og revner vil øge vandtransporten. Indblandet luft virker kapillarbrydende og dermed vil vand på væskefase tvinges til vandre en mere snoet vej mellem boblerne. Vand i dampform vil vandre hurtigere gennem en luftblandet beton, da luftboblerne yder mindre modstand mod diffusion end cementpastaen. Evt. overfladebehandling (f.eks. maling) vil påvirke fugtoptagelse eller –afgivelse og ligeledes vil klimapåvirkninger påvirke fugtudvekslingen.

Transporten af vand pr. tidsenhed gennem et enhedsareal af en skive, fluksen, kan udtrykkes som:

$$\text{Fluks} = \text{transportkoefficient} \frac{\text{potentialeforskel}}{\text{skivetykkelse}}$$

For delvist vandmættet beton kan fluksen  $q$ , gennem en skive med tykkelse  $L$ , udtrykkes som

$$q = D_w(\varphi) \frac{\Delta W}{L} \quad (1)$$

hvor  $D_w$  er en transportkoefficient, der varierer med  $\varphi$ , som står for den relative luftfugtighed i porerne. For vand er  $D$  i størrelsesordenen  $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  (Herholdt et al., 1985). Koncentrationsændringen over tid forårsaget af denne diffusion kan beskrives med Fick's 2. lov:

$$\frac{dC(x,t)}{dt} = D \frac{d^2C(x,t)}{dx^2} \quad (2)$$

Fick's 2. lov er anvendt til at beregne kloridindtrængning i beton (eksempelvis Thoft-Christensen, 2002). Ljung et al. (2002) har antaget, at PCB har spredt sig ind i betonen efter Ficks 2. lov og på baggrund af fire svenske undersøgelser har de beregnet en diffusionskoefficient for PCB-indtrængning i beton og får i gennemsnit  $3 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$  (fra  $1,7 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$  til  $3,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ ). Ljung et al. (2002) forudsætter, at systemet er isotropt materiale (ens egenskaber i alle retninger) og at diffusionskonstanten er uafhængig af koncentrationen og udtrykker diffusionen v.h.a. fejlfunktionen (erf)

$$\frac{C(x,t)}{C_{\text{surface}}} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}}\right) \quad (3)$$

Hvor  $C$  er koncentrationen i beton (mg/kg),  $C_{\text{surface}}$  er koncentrationen i overfladen af betonen (mg/kg),  $x$  er afstanden (m),  $D$  er diffusionskoefficienten ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) og  $t$  er tiden (s). Fejlfunktionen kaldes også en Gauss fejlfunktion og er en funktion med form som en sigmoidkurve. I denne sammenhæng ligger den tæt op ad forløbet for en eksponentielkurve (jf. nedenstående diskussion af kurvetilpasning til prøveserier for beton og tegl).

I forhold til indtrængning af PCB i beton formoder Rex et al. (2002), at indtrængningsdybden hænger sammen med tætheden af betonen. De har derfor antaget en analogi mellem indtrængning af karbonatisering og indtrængning af PCB i beton. En karbonatisering af beton kan ske efter hærningen som følge af en kemisk reaktion mellem kuldioxid fra luften og cementpastaen. Indtrængningen afhænger af betonens tæthed og fugtindhold. Stor tæthed, dvs. lavt vand/cement-forhold og god komprimering, giver ringe indtrængning. Meget tæt og stærk beton karbonatiseres praktisk taget ikke. Beton med stor porøsitet kan omdannes fuldstændigt efter 10 til 20 år. Karbonatisering går meget langsomt i vandmættet eller udtørret beton, men noget hurtigere i middelfugtige betoner. Processen foregår hurtigst, når fugtigheden i den luft, som omgiver betonen, ligger mellem 40-70 % relativ fugtighed og processens hastighed øges med øget temperatur. Indtrængningen af karbonatisering over en 30-40 årig periode (med antagelse om 50% relativ fugtighed) skønnes at ligge under 5 cm (afhænger af trykstyrken af betonen). Karbonatiseringen kan også ske langs revner i betonen (Herholdt et al., 1985). Rex et al. (2002) skriver, at hvis antagelsen om analogi holder, så vil indtrængningsdybden afhænge af sammensætningen af betonen samt måden betonelementet er støbt på.

Pizarro et al. (2002) har undersøgt rengøring og indkapslingsmetoder af PCB-kontamineret beton i forbindelse med spild fra industriel brug. De skriver, at PCB omsluttet af olie i porer i beton kan bevæge sig inde fra betonen og ud til overfladen via transport med olien, diffusion gennem olien, fordampning og/eller i opløsning i et eventuelt nyt oliespild. I deres tilfælde skete der en ret hurtig transport (dage) af PCB fra betonen ud til overfladen i forbindelse med rengøringen og dette forbindes med kapillartransport. Denne reference er dog næppe at sammenligne med situationen med fugemasse og betonnægge. Der kan måske drages visse paralleller mellem PCB indtrængning i beton og spredning og transport af klorede organiske opløsningsmidler i jord, men dette falder udenfor rammerne af denne rapport.

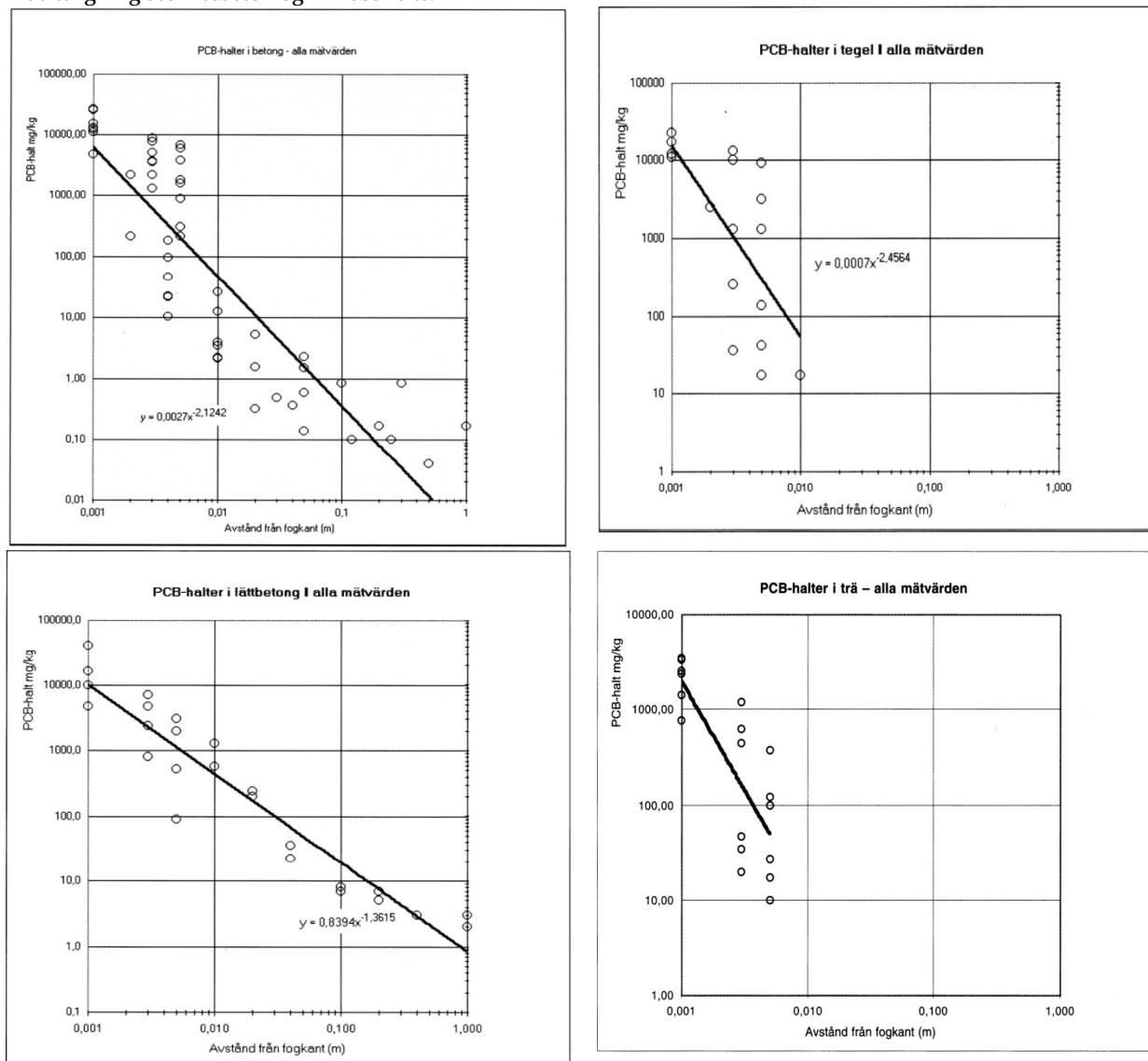
Rex et al. (2002) formoder, at porøsiteten af betonen har betydning for indtrængningen og dette antages også at gælde for letbeton og tegl. Letbeton er en fællesbetegnelse for betoner, der er gjort lette ved anvendelse af lette tilslagsmaterialer (letkornsbeton) eller ved et stort antal luftfyldte porer i massen (porebeton). Autoklavhærdnet porebeton kaldes ofte gasbeton. Porebeton kan fremstilles med forskelligt luftindhold, hvilket bl.a. giver forskellig porøsitet og også medfører variation i materialets øvrige egenskaber (SBI, 1981). Råmaterialet i teglsten er ler, hvor der kan blandes forskellige korrigerende tilsætningsstoffer i. Tilsætningsstofferne kan være andet ler, finkornet sand eller brændbare materialer, f.eks. savsmuld, der efterlader hulrum ved brænding og gør teglen lettere og mere varmeisolerende. Kvaliteten af teglsten hænger sammen med brændingstemperaturen og også med arten af ler og tilsætningsstoffer. Der skelnes mellem frostsikre facademursten og ikke frostsikre bagmursten og ud over disse almindelige former for mursten, fremstilles der en række specielle stentyper enten af særligt ler eller særlig form med forskellige hul- eller kanalsystemer m.v. til forskellige formål (eksempelvis skorstene) (SBI, 1981).

## 1.2 PCB-indhold i byggematerialer

Sundahl et al. (2001) har undersøgt spredning af PCB fra fugemasse til bl.a. beton, tegl, træ, letbeton og puds/letbeton i kombination. Prøverne blev taget ved at opsamle slibestøv i tre forskellige dybder: 0-2 mm, 2-4 mm og 4-6 mm. Alle materialer havde høje indhold af PCB i området lige op til fugen og den store mængde i 0-2 mm blev tilskrevet rester af fugemasse, der fysisk var trængt ind i porerne. Derudover var PCB diffunderet fra fugemassen ind i byggematerialerne. Der var mest indtrængning af PCB i de porøse byggematerialer (beton, tegl og letbeton), mens indtrængning i træ var mindre. Resultaterne viste betydeligt højere PCB-indhold i materialerne end andre svenske prøver, der var taget ved at bore prøverne ud. Dette gav anledning til en ny undersøgelse, hvor slibestøvsmetoden blev sammenholdt med prøvetagning ved at bore, h.h.v. save prøverne ud (Rex et al., 2002). Med forbehold for det begrænsede antal målinger, viste de nye forsøg ingen systematisk forskel på slibestøv og borede prøver. Det var kun muligt at udregne resultater for det yderste lag (0-2 mm) for de savede prøver og dette var sammenligneligt med de andre prøvemethoder. Alle prøverne var indholdsmæssigt lavere i den nye undersøgelse sammenlignet med de tidligere slibestøvsprøver og det angives i rapporten, at de forskellige niveauer kan skyldes betonkvaliteten eller særlige omstændigheder ved den første prøvetagning.

Rex et al. (2002) har lavet en svensk rapport om indtrængning af PCB fra fugemasse til afgrænsende materialer. Rapporten sammenfatter forfatterens egne undersøgelser samt hvad de har kunnet indsamle af data fra andre svenske undersøgelser. Baggrunden for undersøgelsen var ønske om mere viden om indtrængning af PCB i byggematerialer i.f.t. renovering og nedrivning og miljørigtig håndtering af PCB-forurenede restprodukter. Det skal bemærkes, at der hovedsagligt blev undersøgt udvendige fuger (for beton var det kun udvendige fuger). Rex et al. (2002) fandt proportionalitet mellem PCB-indholdet i fugemassen og PCB-indholdet i den tilstødende materialeprøve. For materialeprøver, udtaget som slibestøv eller boreprøver, har Rex et al. (2002) normaliseret målingerne til en fugemassekoncentration på 10 % og afbildet målingerne i et dobbeltlogaritmisk plot med PCB-indholdet (mg/kg) mod indtrængningsdybden for hhv. beton, tegl, letbeton og træ (se figur 1). Generelt var der en stor spredning for beton og Rex et al. (2002) skriver, at variationen i laget 0-2 mm var ca. 50 % mellem de forskellige prøver. Det rapporteres, at den store variation kan skyldes betonkvaliteten og dermed tætheden i de betonelementer, hvor prøverne var taget, idet indtrængningsdybden formodes at hænge sammen med tætheden af betonen. Variationen i tegl var stor, op til 300 gange i de indre lag og det angives, at forskelle i tæthed også her må formodes at være årsag til den store spredning. For letbeton sås en bedre sammenhæng, men stadig med stor spredning. For træ var spredningen mellem højeste og laveste værdi ca. 60, og her formodes det, at både tæthed og overfladebehandling af træet har haft betydning. Samlet set ses sammenlignelig PCB-indtrængning i beton og tegl med en tendens til

større indtrængning i beton, dog er resultaterne på tegl med meget stor spredning. Størst indtrængning ses i letbeton og mindst i træ.



Figur 1. Dobbellogaritmisk afbildning af PCB-indhold (mg/kg) mod indtrængningsdybde i hhv. beton, tegl, letbeton og træ (fra Rex et al., 2002).

Rex et al. (2002) skriver, at forskellige prøvetagningsmetoder og værktøj kan have påvirket måleresultaterne, men samtidigt vil forskelle i tæthed af materialerne også påvirke indtrængningen af PCB og give en stor variation i resultaterne. Ud fra de indsamlede data konkluderer Rex et al. (2002), at det ikke har været muligt at verificere årsagerne til forskellen på de forskellige målinger. De konkluderer derfor, at den store spredning på resultaterne hovedsagligt må tolkes som store reelle forskelle på indtrængning af PCB i de forskellige prøver fra samme materialetype. De skriver endvidere, at det derfor er nødvendigt at tage prøver på hvert enkelt objekt, hvis man vil have et godt grundlag for at vurdere spredningen af PCB.

Sundahl et al. (1999) rapporterer data fra en lokalitet i Gøteborg med en 30 år gammel, udvendig fugemasse, der indeholdt fra 4,7% til 8,1% total PCB. For at undersøge spredningen på måleresultaterne blev der taget to prøver ved hver udtagning og hver prøve blev delt i to inden ekstraktion og analyse. De første 0-2 mm af betonen indeholdt 0,11% / 0,11% total PCB (den ene prøve, delt i to inden ekstraktion og analyse), hhv. 1,7% / 1,8% total PCB (den anden prøve, delt i to). Der blev yderligere taget prøver i en afstand af 2-4 mm og 4-6 mm. De to prøver udtaget fra 2-4

mm indeholdt hhv. 330 ppm/270 ppm og 410 ppm/450 ppm total PCB. De to prøver udtaget fra 4-6 mm indeholdt hhv. 15 ppm/12 ppm og 86 ppm/83 ppm (dobbelbestemmelse). Det fremgår af rapporten, at der var lighed mellem congener-sammensætning i beton og fugemasse. Der gives ingen kommentarer om prøveudtagning og dobbeltbestemmelser, men det ses fra tallene, at ekstraktion og analyse på samme prøvemateriale (delt i to) viser rimelig overensstemmelse, mens der er stor variation (en faktor ti på 0-2 mm prøven) på prøverne udtaget forskellige steder.

En rapport fra et rådgivende firma (Woodard & Curran, 2010), angiver resultater fra undersøgelser af indvendig puds/mursten og beton, der har grænset op til PCB-holdige fuger i en bygning i Massachusetts, U.S.A. For beton fandt de en middelkoncentration på 22,6 mg PCB/kg (7 obs.) i en afstand under 1 inch (< 2,5 cm). I afstanden 8-9 inch (ca. 20-23 cm) fandt de 4,1 mg PCB/kg (15 obs.) og i afstanden 12-13 inch (ca. 30-33 cm) estimerede de en koncentration på 2,7 mg PCB/kg. For pudsen fandt de 44,9 mg PCB/kg, h.h.v. 34,1 mg PCB/kg for prøver i 1 inch afstand (2,5 cm). Det fremgår af rapporten, at der er taget fem prøver i afstanden 4-5 inch (ca. 10-12,5 cm), der alle viste mere end 1 mg PCB/kg og at gennemsnitsværdien i afstanden 4-5 inch var 4,0 mg PCB/kg. Pudsprøver i en afstand af 12-13 inch viste 4,2 mg PCB/kg, h.h.v. 4,7 mg PCB/kg. Fire ud af fem underliggende mursten viste alle koncentrationer af PCB på under 1 mg/kg. Det oplyses ikke, hvor meget af murstene, der var taget til prøverne. Mursten i en afstand af 4-5 inch (10-12,5 cm) fra PCB-holdige fuger viste koncentrationer af total PCB i intervallet 0,33-1,8 mg/kg (5 observationer taget på forskellige etager).

Chang et al. (2002) har analyseret tegl og murværksoverflader i.f.t. PCB og afsmitning fra fuger. De skriver, at indtrængningen var meget variabel og i forhold til et koncentrationskriterium på 1 ppm PCB fandt de, at indtrængningsdybden varierede fra ca. 1-5 cm fra fugen eller i visse tilfælde, at hele murstenen måtte fjernes. De skriver, at den pågældende bygning repræsenterede overflader med forskellig porøsitet og kunne derfor konkludere, at porøsitet og overfladebehandling havde betydning for indtrængningen.

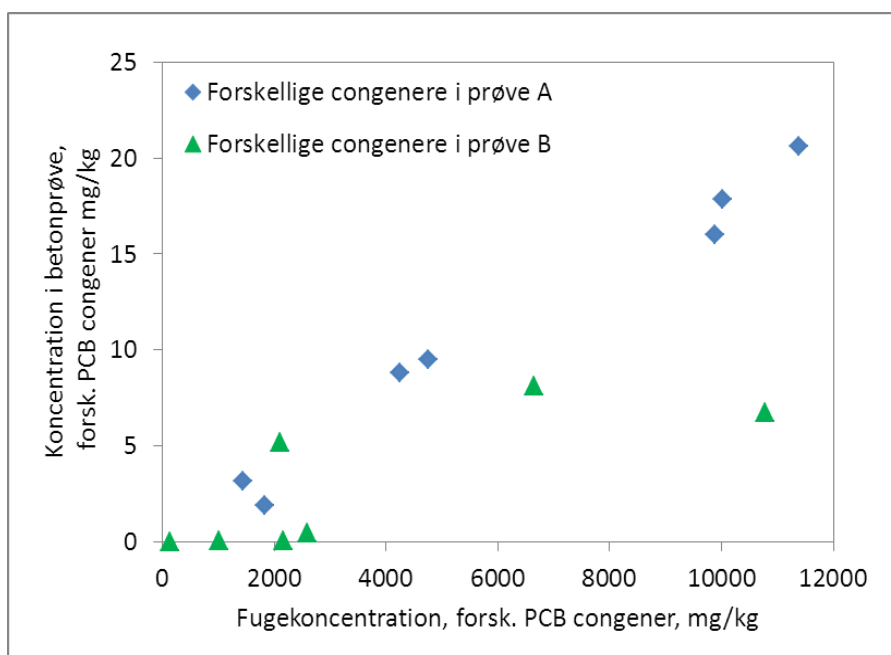
Grontmij/Carl Bro et al. (2011) refererer bl.a. til undersøgelserne i Birkhøjterrasserne i Farum. Det blev anslået, at der totalt set var anvendt over 500 kg PCB i byggeriet. Ved undersøgelser udført i 2009-2010 blev det anslået, at omkring 82 % findes i fugemateriale, mens resten er spredt til andre materialer, hvoraf beton langs fugerne indeholder størst mængde, men også malede betonvægge har modtaget store mængder PCB fra luften. Undersøgelserne viser, at PCB har spredt sig til tilstødende materialer (murværk, beton, vinduesrammer o. lign). Der blev konstateret indtrængningsdybder i størrelsesorden 1-10 cm. Indtrængningsdybden i de tilstødende materialer varierede dog meget og var bl.a. stærkt afhængig af porøsiteten af det tilstødende materiale. De skriver, at næsten 3 cm beton, 1 cm træværk og 7 cm masonit langs fuger havde en PCB koncentration over 50 mg/kg.

## 2. Prøveserier fra byggesager

Sideløbende med litteraturstudiet har NIRAS og DMA indsamlet oplysninger om fund af PCB i gennemførte nedrivninger og renoveringer fra perioden 1950–1977. I denne forbindelse er der behandlet datasæt af eksisterende kemiske analyser af byggematerialer, hvor der er fundet PCB og der er udvalgt 21 prøveserier med betonprøver, seks med teglprøver og to med gasbetonprøver, hvor der er taget prøver af byggematerialerne i stigende afstand fra fugen. Prøverne er alle fra udvendige fuger og er udtaget over en periode på 5 år (2008-2012). Prøverne stammer fra forskellige bygninger og fra forskellige typer af beton/tegl/gasbeton og er ikke klassificeret efter bygningstype eller nærmere karakteriseret i.f.t. materialeegenskaber. Prøverne er udtaget af forskellige fagpersoner og for betons vedkommende er de enten boret ud i kerner, skåret ud med vinkelskærer eller banket ud. Teglprøverne er banket ud og gasbetonen er banket eller skåret ud. De er alle udtaget efter vejledning om rensning af det anvendte værktøj, samt vurdering af bedste mulighed for at minimere krydskontaminering ved udtagelse. En måde at minimere krydskontaminering er at bore/skære fra den modsatte side af fugen og dermed undgå at trække PCB fra fugen ned langs dybderetningen for prøveudtagelsen. Alle prøver er opskåret efter de angivne intervaller (ca. 1 cm) og nedknust før ekstraktion, dog er de første 1,5 mm af betonen fjernet, idet denne fraktion indeholder fugerester. Det nedknuste materiale er ekstraheret med cyclohexan/acetone (50:50). Efterfølgende er prøverne analyseret ved GC-ECD eller GC-MS for indhold af PCB7 (congenerne 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180).

### 2.1 Fugekoncentration af PCB

Sommetider er der lighed mellem sammensætningen af congenere af de syv PCB'er fra den kemiske analyse af fugemassen og sammensætningen i prøven fra det tilstødende materiale, men det er ikke altid tilfældet. Figur 2 viser to eksempler på koncentrationer af de enkelte kongener i fugematerialet hhv. den tilstødende betonprøve, afbildet mod hinanden. For prøve A (de blå punkter) er der en lineær sammenhæng mellem koncentrationen af de syv kongener i fuge og materialeprøve, d.v.s. der forholdsvis er det samme indhold i de to typer prøver og de stemmer godt overens. I det andet tilfælde B (grønne punkter) er der ikke en lineær sammenhæng og dermed ikke overensstemmelse mellem fuge og prøvemateriale. Passer sammensætningen af congenere i analysen af fugemassen med en kendt kommerciel produkttype, kan det ofte antages, at der findes en specifik faktor, der omregner indholdet af PCB7 til det totale indhold af PCB. Er sammensætningen af congenere derimod ukendt i forhold til produkttype, korrigeres ofte med en faktor på 5 (Københavns Kommunes PCB-vejledning, 2010) for at komme fra analysens PCB7 resultat til en estimering af det totale indhold af PCB. Da ikke alle de udvalgte prøver har match mellem congenersammensætning i fugemassen og materialeprøve, er resultaterne angivet i de reelt målte PCB7 koncentrationer og senere korrigeret til PCB total med en faktor på 5.

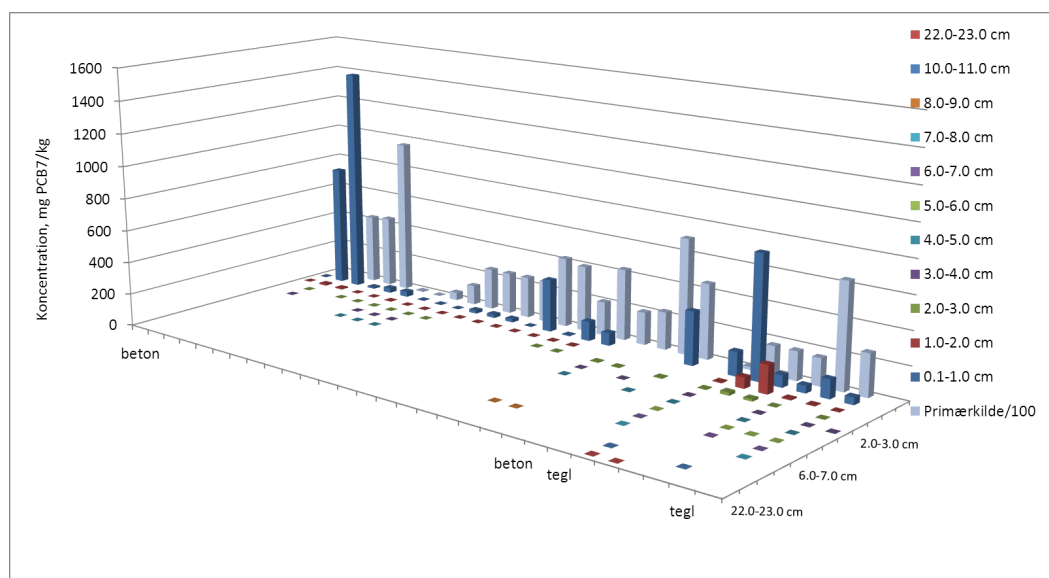


Figur 2. Koncentrationen af kongener (PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180) fra analyse af fugemasse og betonprøve (afstand 1.5-9 mm fra fuge) fra to forskellige bygninger.

Der er set på de enkelte kongener i.f.t. indtrængningen af PCB i beton og tegl. Da forskellige typer fugemasse har forskellig sammensætning af kongener er det vanskeligt at sige noget generelt om prøveserierne. Nogle prøveserier tyder på, at kongener nr. 28 relativt er trængt en anelse længere ind i byggematerialet end de øvrige kongener, men samtidig er de fleste af netop disse prøveserier med et meget lavt indhold af kongener 28 i.f.t. de andre kongener. Det er vurderet, at en dybdegående analyse af kongener ikke har tilstrækkelig relevans til at blive prioriteret indenfor projektets rammer.

Figur 3 viser indholdet af PCB7 i fugemateriale (primærkilde – divideret med 100) samt beton- og teglprøver i varierende afstand fra fugen. Det ses, at fugeindholdet af PCB7 er meget varierende. Det kan skyldes variation i udgangspunktet for den oprindelige fuge, udskiftning af fugen og/eller variation i nedbrydning over tid, bl.a. afhængigt af fugens påvirkning fra vejrlig. Det ses yderligere, at der ikke er nogen umiddelbar sammenhæng mellem indholdet af PCB7 i fugemassen og indholdet i materialeprøverne tæt på fugen. En høj koncentration i materialet er ikke nødvendigvis en følge af en høj fugemassekoncentration på det tidspunkt, hvor prøverne er taget. Det betyder omvendt, at man ikke kan udelukke en betydelig forurening af byggematerialer trods fund af forholdsvis lave koncentrationer af PCB i fugemassen. Den manglende sammenhæng er yderligere årsag til, at nedenstående resultater ikke er normeret til en bestemt fugekoncentration, da dette ikke giver mening pga. de meget store variationer i fugemassekoncentrationen.

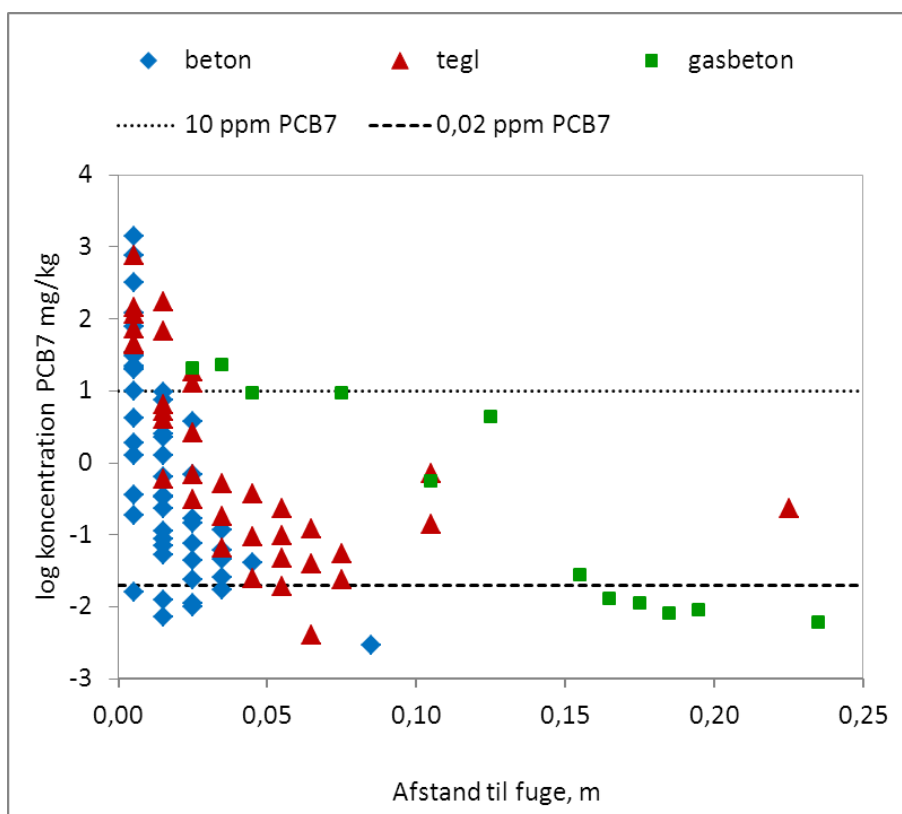




Figur 3. PCB7 koncentration (mg/kg) i beton (21 prøver) og tegl (6 prøver) i forskellige afstande til fugen, der er primærkilden. Primærkilden er angivet som koncentrationen divideret med 100.

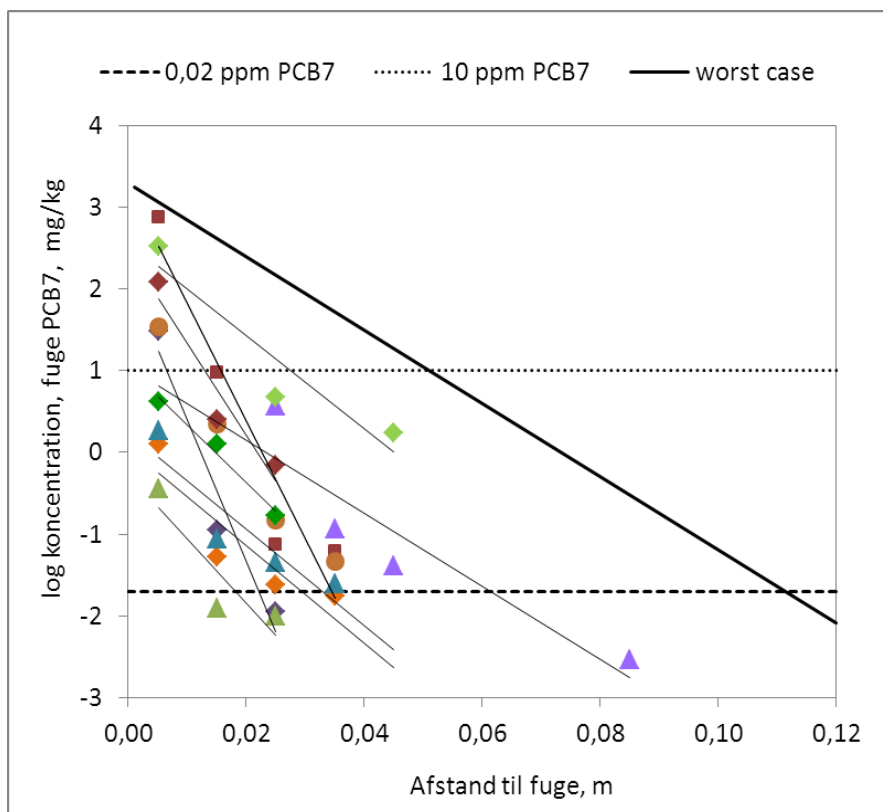
## 2.2 PCB-indhold i.f.t. afstand til fuge

Figur 4 viser koncentrationerne af 10 tals logaritmen til PCB7 i prøver fra beton, tegl og gasbeton i varierende afstand fra fugen. Afstanden til fugen er angivet som værdien midt i den udtagne prøve, således er en prøve fra 1-2 cm angivet ved en afstand på 1,5 cm. På figuren er indtegnet to koncentrationstværsnit: 10 ppm PCB7 (svarende til 50 ppm PCB total) og 0,02 ppm PCB7 (svarende til 0,1 ppm PCB total), hvilket er grænseværdierne for hhv. farligt affald og affald, der kan anses for PCB-frit og dermed egnet til genbrug (Københavns Kommunes PCB vejledning, 2010). Det ses på figuren, at koncentrationen i materialeprøverne falder med stigende afstand til fugen, dog ligger der enkelte høje værdier for tegl i en afstand af mere end 0,1 m til fugen. Det skal bemærkes, at de to teglprøver (den ene i afstanden 0,11 m og den i afstanden 0,23 m) har en sammensætning af congenere, der svarer til et andet kommercielt produkt end sammensætningen af seriens øvrige prøver. Dette kan betyde, at prøverne er kontamineret fra anden kilde og derfor er der set bort fra disse prøver. Generet ses mindre indtrængning i beton end i tegl dog med et betydeligt overløb. Størst indtrængning ses i gasbeton.



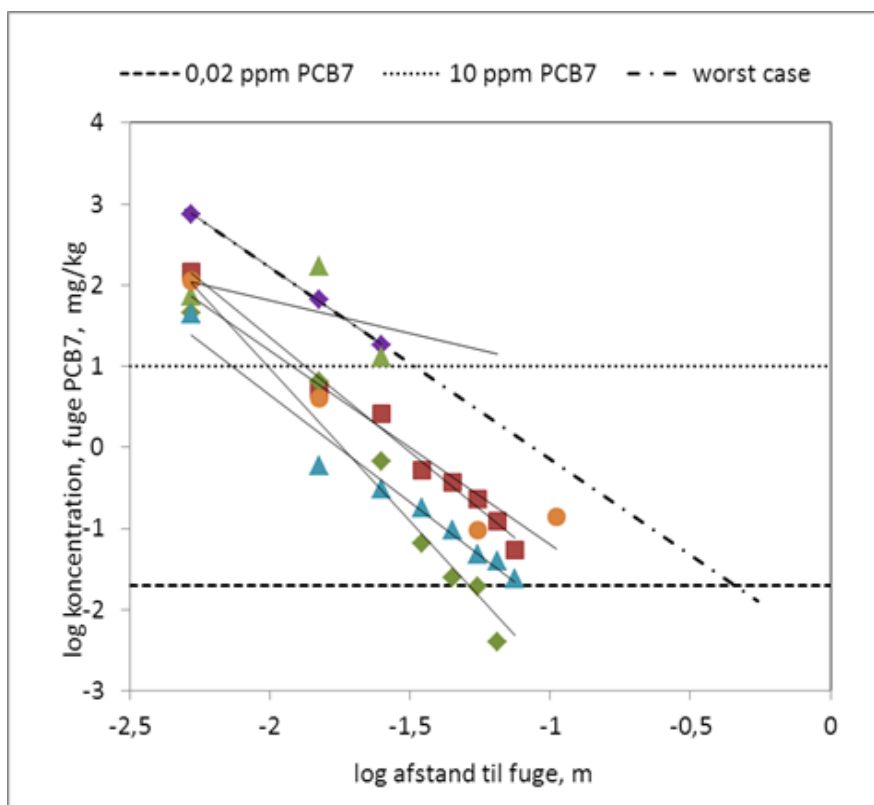
Figur 4. log PCB7 koncentration (mg/kg) i beton, gasbeton og tegl i forskellige afstande til fugen. Der er en markering af værdien 0,02 ppm PCB7 og 10 ppm PCB7, der omsat til total PCB repræsenterer grænseværdien for genanvendeligt byggeaffald (0,1 ppm) og grænseværdien på 50 ppm for farligt affald.

Der er ti betonprøveserier, hvor der er lavet en koncentrationsbestemmelse af PCB7 i tre eller flere afstande fra fugen. Disse resultater er gengivet på figur 5, hvor den logaritmerede koncentration er afbildet som funktion af afstanden til fugen og den lineære regressionslinje er indtegnet for hver prøveserie. Der er god korrelation på regressionslinjerne ( $R^2$ -værdier i intervallet 0,79-0,98). Der er indtegnet en "worst case" linje på de udvalgte data. Worst case linjen har den højeste skæring og den (numerisk) mindste hældning af de estimerede regressionslinjer. Worst case skal dermed repræsentere den højeste koncentration målt tæt på fugen samt det svageste koncentrationsfald (største indtrængning), der er observeret i de pågældende prøveserier. Denne meget grove fremgangsmåde er valgt fordi prøveseriernes repræsentativitet er ukendt. Worst case tilgangen viser, at man, på baggrund af disse betonprøver, vil være nede på koncentrationen på 10 ppm PCB7 i en afstand af 5 cm fra fugen, mens man er nede på 0,02 ppm PCB7 i en afstand af 11 cm fra fugen. Det skal understreges, at her ikke er tale om et generelt resultat, da vi ikke ved, hvad de pågældende betonprøver repræsenterer i.f.t. betonkvalitet m.v.



Figur 5. Logaritmen (10 tals) til PCB7 koncentrationen (mg/kg) i beton i de prøveserier, der har tre eller flere prøver i varierende afstand fra fugen. Den lineære regressionslinje er indtegnet for hvert prøvesæt. "Worst case" linjen er indtegnet som den linje, der har det højeste skæringspunkt og den mindste (numeriske) hældning i.f.t. regressionslinjerne. Der er en markering af værdien 0,02 ppm PCB7 og 10 ppm PCB7, der omsat til total PCB repræsenterer grænseværdien for genanvendeligt byggeaffald (0,1 ppm) og grænseværdien på 50 ppm for farligt affald.

På figur 6 er afbildet data fra analyse af prøveserier med tegl, hvor koncentrationen af PCB7 er aftegnet mod afstanden til fuge i et dobbeltlogaritmisk plot, da denne dobbeltlogaritmiske afbildning giver en klart bedre linearitet på de pågældende data end en logaritme/lineær afbildning, som ellers vil være lettere at forklare med baggrund i en model for diffusion ind i et homogent porøst materiale. Som ovenfor nævnt er der set bort fra to prøver i en af prøveserierne, da sammensætningen af congenere tyder på, at disse er kontamineret fra en anden kilde. På figuren er indtegnet de lineære regressionslinjer og ses bort fra en enkelt måleserie (grønne trekanter), er der god korrelation ( $R^2 > 0.92$ ). Grænseværdien på 0,02 ppm PCB7 for genanvendelse af byggematerialerne og værdien på 10 ppm for farligt affald er indtegnet. Følges mønstret for den afvigende måleserie, vil man i praksis aldrig nå under grænseværdien for genanvendelse af affaldet. Betragtes "worst case" (jf. ovenstående om beton) for de resterende måleserier, falder den sammen med en af prøveserierne og er markeret med en stiplede linje på figuren. Omregnes tallene, estimeres det, at grænseværdien på 10 ppm for farligt affald ligger ved 3,5 cm, mens grænseværdien 0,02 ppm opnås i en afstand af ca. 46 cm fra fugen. De øvrige teglprøver når 0,02 ppm niveauet i 5-16 cm's afstand fra fugen. Afstanden fra fuge til 10 ppm grænsen er på niveau med den, der ses for beton, mens afstanden til grænseværdien på 0,02 ppm for worst case er væsentlig længere end for betonprøverne, mens de andre prøver ligger på niveau med beton. Afstanden på de 46 cm vurderes erfaringsmæssigt at være urealistisk høj og det spekuleres, om prøven kan være påvirket af forurenet mørtel eller om der har været tale om en særlig slags mursten eller andre særlige forhold med prøven.



Figur 6. log PCB7 koncentration (mg/kg) i tegl i varierende afstand (logaritmisk) fra fugen. Den lineære regressionslinje er indtegnet for hvert prøvesæt. "Worst case" regressionslinjen med højeste skæringspunkt og den mindste (numeriske) hældning er markeret med en stiple linje (sammenfaldende med en prøveserie). Der er yderligere en markering af værdien 0,02 ppm PCB7 og 10 ppm PCB7, der omsat til total PCB repræsenterer grænseværdien for genanvendeligt byggeaffald (0,1 ppm) og grænseværdien på 50 ppm for farligt affald.

Ud fra det foreliggende materiale ses en længere indtrængning af kontamineringen i tegl sammenholdt med beton, selvom der også relativt set er taget flere prøver i større afstand til fugen på tegl. Den større indtrængning i tegl kan skyldes en større porøsitet af materialet sammenlignet med beton. For beton fulgte koncentrationsforløbet en eksponentiel kurve (linearitet på et log-lineær plot), mens det for tegl noget overraskende er en potenskurve (linearitet på et log-log plot), der giver den bedste tilpasning. Det eksponentielle koncentrationsforløb for beton kunne tyde på en diffusion efter Fick's 2. lov (jf. ovenstående). For prøveserierne med tegl er det i høj grad prøven tættest på fugen, der giver anledning til log-log forløbet. Var disse prøver lavere ville forløbet i højere grad ligne en eksponentiel funktion og det er spekuleret, om forløbet tæt på fugen for tegl kan skyldes en større fysisk indtrængning af fugemasse i det formodede mere porøse materiale sammenlignet med beton. Dermed må de første høje værdier forklares med en væsentlig anden og mere kraftig indtrængningsmekanisme, der i større dybde overgår til diffusion på linje med beton. Der er lavet en worst case beregning på prøveserierne, hvor prøven tættest på fugen, er udelukket. Herved opnås et eksponentielt forløb og denne udregning viser, at grænseværdien på 0,1 ppm PCB total nås i en afstand af 28 cm fra fugen. Ses på de absolutte koncentrationer i teglprøverne tættest på fugen på figur 3, er de dog ikke specielt høje sammenlignet med beton. Nedenstående refereres til den worst case, der er beregnet på baggrund af hele prøveserier.

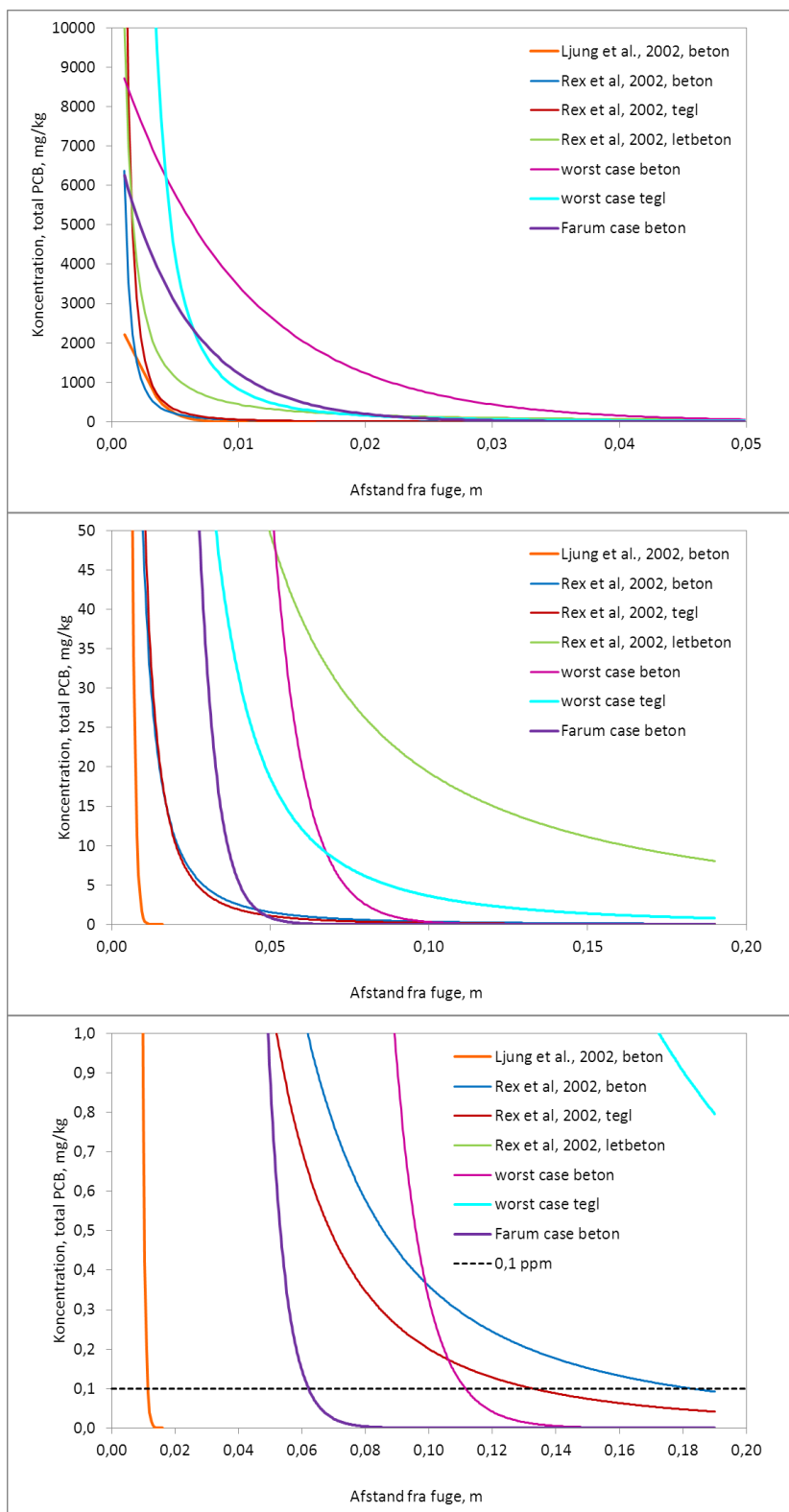
Datamaterialet om gasbeton er meget sparsomt (to måleserier) og ikke analyseret yderligere. Af figur 4 ses, at de pågældende prøver når under grænseværdien på 10 ppm PCB7 (50 ppm PCB total) i en afstand af 5-8 cm, mens grænseværdien på 0,02 ppm PCB7 (0,1 ppm PCB total) nås i en afstand af ca. 16 cm fra fugen. Det skal dog bemærkes, at den ene prøveserie kun går til 15 cm, så værdierne i længere afstand er fra én enkelt prøveserie.

SBi har desuden regnet på en enkelt prøveserie af beton, der har grænset op til en indvendig fuge i Farum Midtpunkt og rapporteret af Grontmij/Carl Bro et al. (2011). Dette resultat (betegnet "Farum case") er sammenholdt med de andre resultater nedenfor.

### 3. Sammenligning af data og litteratur

De forskellige relationer mellem indhold af PCB i byggematerialer og afstanden til fugen (Rex et al., 2002, Ljung et al., 2002 samt nærværende data – dog ikke det meget sparsomme materiale på gasbeton) er sammenlignet og sammenholdt med grænseværdien på 50 ppm PCB total for farligt affald og 0,1 ppm PCB total for genanvendeligt affald. Dette til trods for, at alle tal må forventes at være forbundet med store usikkerheder. For at regne med den foreslåede diffusionskoefficient fra Ljung et al. (2002) er her antaget en tid (40 år) og en overfladekoncentration estimeret til 3% af fugekoncentrationen (det er antaget, at der er afsat fuge med en koncentration på 10% i de første 2 mm af en beton med 6% hulrum).

På figur 7 er afbildet potensfunktionerne for koncentrationsindhold af PCB i.f.t. afstanden til fugen fra Rex et al. (2002) for beton, tegl og letbeton (ligningerne ses på figur 1 i log-log afbildningerne). Derudover er afbildet en estimering af forløbet med diffusionskoefficienten for beton ifølge Ljung et al. (2002). Denne kurve er optegnet med direkte baggrund i Fick's 2. lov, der giver værdier tæt på det eksponentielle forløb (jf. ovenstående). Det skal bemærkes, at denne kurve ikke ændrer sig væsentligt i det interval Ljung et al. (2002) opgiver for diffusionskoefficienten. Yderligere er afbildet "worst case" (jf. ovenstående) for beton og tegl baseret på nærværende dataanalyse (eksponentielt-, hhv. potensfunktionsforløb, jf. ovenstående). Derudover er afbildet et kurveforløb baseret på en prøveserie fra Farum Midtpunkt (Farum case, jf. ovenstående). Kurverne er afbildet på tre forskellige skalaer. I midten er den øvre skalaværdi 50 ppm PCB total svarende til grænseværdien for farligt affald. Nederst er grænseværdien for genanvendelse af affaldet indsat (0,1 ppm PCB total).



Figur 7. Kurvefit til de forskellige resultater på koncentrationen af total PCB i beton, tegl og letbeton i forhold til afstanden til fugen. De tre figurer er de samme data, men med forskellige akseinddelinger. På den midterste figur er den øvre værdi på y-aksen 50 ppm PCB total svarende til grænseværdien for farligt affald. På nederste figur er grænseværdien på 0,1 ppm PCB total for genanvendeligt affald angivet.

Det ses af figur 7, at der er forskel på de forskellige resultater og estimater, både hvad angår forskellige referencer og forskellige materialer. Diffusionskoefficienten for beton (Ljung et al, 2002) og de anvendte antagelser m.h.t. tid og koncentration giver væsentlig mindre indtrængning i beton

end resultaterne fra Rex et al. (2002), den her præsenterede worst case samt prøveserien fra Farum (Farum case).

Grænseværdien på 50 ppm for farligt affald (figur 7, midterste figur) nås for alle estimerne i afstande fra under 1 cm og op til 5 cm. Ljung et al (2002) forudsigelsen viser, at allerede 1 cm inde i betonen er man under 50 ppm og Rex et al (2002) forudsiger, at man 1 cm inde i både beton og tegl når under de 50 ppm PCB total. Farum casen for beton og worst case senariet for tegl kommer under en koncentration på 50 ppm efter 3-3,5 cm, hvilket for Farum casen stemmer overens med Grontmij/Carl Bro et al. (2011), der skriver, at de finder 50 ppm i op til 3 cm fra fugen i Birkhøjterasserne i Farum. Worst case senariet for beton samt Rex et al. (2002) for gasbeton når under 50 ppm efter 5 cm.

For beton ses, at Rex et al. (2002) og worst case beton når et koncentrationsniveau omkring de 0,1 ppm total PCB i en afstand på 18 cm, hhv. 11 cm. For tegl ligger Rex et al. (2002) lidt under værdierne for beton (13 cm) i.f.t. grænseværdien, men deres relation (baseret på figur 1) er forbundet med stor usikkerhed. Estimatet fra Ljung et al (2002) når under 0,1 ppm PCB total 1 cm inde i betonen. Worst case tegl (hvor der er set bort fra en prøveserie, der viser omfattende kontaminering) viser, at PCB'en spreder sig til en afstand på 46 cm før koncentrationen er faldet til grænseværdien, hvilket er væsentlig længere indtrængning end de svenske tal tyder på selvom de også er forbundet med stor usikkerhed. Rex et al. (2002) data på letbeton viser høje værdier i.f.t. grænseværdien på 0,1 ppm PCB og det må forventes, at spredningen af PCB når langt ud (> 1 m). De her bearbejdede data på gasbeton tyder ikke på så stor spredning, men datamaterialet er meget spinkelt.

De rapporterede resultater fra det rådgivende firma Woodard & Curran (2010) på beton viste en gennemsnitsværdi på knap 3 mg PCB/kg (3 ppm PCB) i en afstand på ca. 30-33 cm fra fugen, hvilket er langt højere koncentrationer end de svenske og danske undersøgelser har vist. Det skal bemærkes, at de amerikanske tal er for indvendige fuger. Prøver fra mursten i en afstand på 10-12,5 cm fra PCB-holdige fuger viste koncentrationer af total PCB i intervallet 0.33-1.8 mg/kg, dvs. over grænseværdien for affald til fri genanvendelse. På de her analyserede data viser worst case på tegl, at i en afstand på 11 cm, er niveauet for koncentrationen af total PCB på ca. 3 mg, dvs. højere end den amerikanske undersøgelse. I.f.t. Chang et al. (2002), der fandt 1 ppm PCB total i mursten i en afstand af 1-5 cm eller længere, viser worst case for tegl på de aktuelle data en større afstand og samtidig vurderes denne worst case også erfaringsmæssigt at være urealistisk høj.

Rex et al. (2002) skriver, at de observerede meget store variationer i indtrængningen af PCB i byggematerialer formentlig reelt afspejler, at der er store variationer.. Om end resultaterne her og de præsenterede relationer fra Rex et al. (2002) er behæftet med store usikkerheder, så ses det generelt, at ser man bort fra den danske prøveserie med gasbeton, så er man i en afstand af 5 cm fra fugen på alle de andre refererede materialer/cases under grænseværdien på 50 ppm for farligt affald. I.f.t. genanvendelse af byggematerialerne og kravet om et indhold af PCB under 0,1 ppm, må man, som også anbefalet af Rex et al. (2002), i hver enkelt byggesag tage prøver for at sikre sig, at man håndterer materialerne korrekt. De angivne afstande kan bruges som en indikation for, at man kan have behov for at tage prøver ud til disse afstande eller længere, hvis der viser sig PCB i primærkilden/fugemassen.



# Referencer

Andersson M., Ottesen R.T. & Volden T. (2004) Building material as a source of PCB pollution in Bergen, Norway. *Science of the total environment* 325, 139-144

Chang M., Coghlan K. & McCarthy J. (2002) Remediating PCB-containing building products; strategies and regulatory considerations. *Proceedings: 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, June 30–July 5 2002, Monterey, CA, Vol. 4 (Levin H, ed). Santa Cruz, CA: Indoor Air, 2002 p. 171-176

Herholdt A.D., Justesen C.F.P., Nepper-Christensen P. & Nielsen A. (1985), *Betonbogen*, Aalborg Portland, Cementfabrikkernes tekniske Oplysningskontor, 2. udgave 1985, ISBN 87-980916-0-8.

EPA (2009), Current best practices for PCBs in caulk fact sheet, removal and clean-up of PCBs in caulk and PCB-contaminated soil and building material.  
<http://www.epa.gov/pcbsincaulk/caulkdisposal.htm>

Grontmij / Carl Bro, Erhvervs og Byggestyrelsen og Socialministeriet (2011) *Afhjælpningstiltag ved forhøjede PCB-niveauer i indeklimaet*, Rune Haven, Majbrith Langeland og Morten Hjort. 242 s.

Hellman S. J. & Puhakka J. A. (2001) Polychlorinated biphenyl (PCB) contamination of apartment building and its surroundings by construction block sealants. *International conference on practical applications in environmental geotechnology ecogeo 2000*, Edited by Reijo Salminen. Geological survey of Finland, special paper 32, 123-127.

Herrick R. F., Lefkowitz D. J. & Weymouth G. A. (2007) Soil Contamination from PCB-Containing Buildings, *Environmental Health Perspectives*, vol. 115, no.2, 173-175.

Jartun M., Ottesen R.T., Steinnes E. & Volden T. (2009) Painted surfaces – important sources of polychlorinated biphenyls (PCBs) contamination to the urban and marine environment. *Environmental pollution* 157, 295-302.

Jensen A.A., Schleicher O., Sebastian W., Trap N. & Zeuthen F. (2009) Forekomst af PCB i en- og tofamiliehuse. Rapport til Erhvervs- og Byggestyrelsen, Miljøstyrelsen og Arbejdstilsynet, EBST sagsnr. 09/02028

Københavns Kommunes PCB-vejledning, 2010  
[http://www.kk.dk/Nyheder/2010/September/~/\\_media/43B5018AFB1541258EAC2BFED06023B8.ASHX](http://www.kk.dk/Nyheder/2010/September/~/_media/43B5018AFB1541258EAC2BFED06023B8.ASHX) (01.02.2012)

Pizarro G., Dzombak D.A. & Smith J.R. (2002) Evaluation of cleaning and coating techniques for PCB-contaminated concrete. *Environmental Progress*, vol. 21, no.1, 47-56.

Priha E., Hellman S. & Sorvari J. (2005) PCB contamination from polysulphide sealants in residential areas—exposure and risk assessment. *Chemosphere* 59, 537-543

Rex G., Sundahl M. & Folkesson I. (2002) Spridning av PCB från fogmassor till angränsande material. Rivning och sanering vid riv. FoU-Väst, Rapport 0202. ISSN 1402-7410.

SBI (1981) Mørtel, muring, pudsning. SBI-anvisning 64. 2. udgave, Statens Byggeforskningsinstitut, ISBN 87-563-0411-0.

Sundahl M., Sikander E., Ek-Olausson B., Hjorthage A., Rosell L. & Tornevall M. (1999) Determinations of PCB within a project to develop cleanup methods for PCB-containing elastic sealant used in outdoor joints between concrete blocks in buildings. J. Environ. Monit., 383-387.

Sundahl M., Hjorthage A., Torstensson C. & Ek-Olausson B. (2001) Spridning av pcb från PCB-haltiga fogmassor till angränsande byggmaterial, Provtagningar, analyser och utvärdering. SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, SP rapport 2001:02, ISBN 91-7848-843-5

Thoft-Christensen P. (2002) Stochastic modelling of the diffusion coefficient for concrete. IFIP Working Conference, Osaka, Japan, ISSN 1395-7953 R0204, 10 pp.

Woodard & Curran (2010): PCB remediation, risk-based disposal and cleanup. University of Massachusetts, 222955.00, March 2010. 1.866.702.6371, 35 New England Business center, Andover, MA. Rådgivningsrapport.

## **Kortlægning af eksisterende viden om indtrængning af PCB fra fuger til beton – en litteraturgennemgang**

Der er gennemført et litteraturstudie om indtrængningen af PCB i byggematerialer, der grænser op til PCB-holdig fugemasse, med særlig vægt på beton og tegl.

Der er store variationer i de rapporterede data, hvorfor det anbefales, at man i hver byggesag tager prøver for at sikre sig, at man håndterer materialerne korrekt.

Det tyder på, at man når under grænseværdien for farlig affald på 50 ppm i de undersøgte materialer ved en afstand af 5 cm fra fugen. Det forventes, at jo mere porøst materiale jo større indtrængning.



**Miljøministeriet**  
Miljøstyrelsen

Strandgade 29  
DK - 1401 København K  
Tlf.: (+45) 72 54 40 00

**[www. mst.dk](http://www.mst.dk)**